



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Innovaciones metodológicas en docencia universitaria: resultados de investigación

Coordinadores

José Daniel Álvarez Teruel

Salvador Grau Company

María Teresa Tortosa Ybáñez

Coordinadores
José Daniel Álvarez Teruel
Salvador Grau Company
María Teresa Tortosa Ybáñez

© Del texto: los autores. 2016
© De esta edición:
Universidad de Alicante
Vicerrectorado de Estudios, Formación y Calidad
Instituto de Ciencias de la Educación (ICE), 2016

ISBN: 978-84-608-4181-4

Revisión y maquetación:
Salvador Grau Company
Daniel Gallego Hernández

35. Experiències senzilles de física recreativa: Conservació del moment lineal, efecte Coandă i emissió atòmica

*Isabel Abril¹, Vicent Esteve¹, Wynand Dednam^{1,2}, Jesús Martínez Asencio¹
Miguel Gullón¹, Rafael Garcia-Molina³*

¹Departament de Física Aplicada, Universitat d'Alacant, E-03080 Alacant, Spain

²Department of Physics, Science Campus, University of South Africa, Private Bag
X6, Florida Park 1710, South Africa

³Departamento de Física - Centro de Investigación en Óptica i Nanofísica,
Regional Campus of International Excellence "Campus Mare Nostrum",
Universidad de Murcia, E-30100 Murcia, Spain

RESUM. La realització pràctica d'experiments és fonamental en qualsevol disciplina científica. Per això, en aquest treball exposem una sèrie d'experiències de física senzilles i sorprenents que ens permetran reforçar diversos conceptes físics d'una manera amena, utilitzant materials molt assequibles i barats. Amb la realització d'aquests experiments volem estimular la curiositat de l'alumnat i el plaer per la investigació i el descobriment de nous fenòmens físics. Aquestes experiències estan adreçades tant a estudiants d'educació secundària i batxillerat com a alumnes dels primers cursos d'universitat. Hem dissenyat i dut a terme experiències de diversos camps de la física, entre els quals hi ha algunes pràctiques per a posar de manifest la conservació del moment lineal, o l'efecte Coandă en fluids en moviment, i també experiments de física atòmica relacionats amb l'emissió atòmica en l'espectre visible, que posen de manifest la quantització de l'energia dels nivells atòmics. Amb aquestes experiències volem motivar els alumnes en l'estudi i l'interès per la física des d'una perspectiva diferent de l'habitual.

Paraules clau: física, física recreativa, experiments senzills, conceptes físics, recursos didàctics.

1. INTRODUCCIÓ

En física és fonamental la realització d'experiments per a descobrir nous fenòmens i posar a prova les teories enunciades. D'aquesta manera es va desenvolupant un marc conceptual que ens permet comprendre la natura i utilitzar aquest coneixement per a millorar la nostra qualitat de vida. Necessitem obtenir principis generals a partir de l'observació i l'experimentació. Així, els experiments són bàsics, ja que a través de les observacions s'accepten o refuten les hipòtesis i les teories, i d'aquesta manera es va avançant en la comprensió i en el coneixement de les lleis de la natura [Chalmers 1988].

La realització d'experiències científiques és essencial en l'ensenyament de la física [Caamaño 1992], ja que els estudiants tenen la possibilitat d'explorar, manipular, suggerir hipòtesis, cometre errors, reconèixer-los i, per tant, aprendre d'aquests. També són molt útils per a estimular l'elaboració d'idees i raonaments, per a explicar les observacions realitzades, i per a l'elaboració de models que puguin explicar aquestes observacions. De vegades els estudiants poden trobar resultats inesperats, la qual cosa estimularà el seu procés d'aprenentatge i mantindrà el seu interès per la matèria.

La resolució de problemes experimentals ha de ser un repte per als estudiants, ja que, a més de poder comprovar si els seus conceptes teòrics són correctes i estan ben consolidats, poden adquirir confiança en el coneixement de la física. Altres objectius molt importants en el procés d'aprenentatge que es poden assolir amb la realització pràctica d'experiments de física són la potenciació de la creativitat, l'anàlisi i elaboració dels informes de laboratori que faciliten que l'estudiant sintetitzi i ordene les seues observacions, a més d'aprendre a comparar els resultats experimentals amb les dades teòriques, veure-hi l'acord obtingut i establir conclusions de treball. Com que la majoria dels projectes experimentals es fan en grup, també es promou la cooperació entre els estudiants i el treball en equip. Així, podem concloure que la realització d'activitats experimentals desenvolupa una sèrie d'eines que són molt importants en l'educació de l'alumne, no sols en l'àmbit científic, sinó també en qualsevol activitat professional o empresarial que hagen d'efectuar en el futur.

La utilització d'experiències de física recreativa en l'aula és una excel·lent eina pedagògica [Garcia Molina 2011]. Experiments amens, senzills en la seua presentació, moltes vegades utilitzant materials casolans i, en ocasions sorprenents, són molt útils per a estimular l'interès dels alumnes per la física, o la ciència en general, ja que poden emprar-se per a visualitzar i comprendre diversos fenòmens i consolidar conceptes físics, moltes vegades mal transmesos en les classes teòriques [Solbes, Lozano & Garcia Molina 2009]. Per aquesta raó cada vegada es més freqüent que s'utilitzen experiments de física recreativa en l'àmbit docent com a complement d'altres propostes didàctiques [Hoffmann & McGuire 2009].

En aquest treball proposem i expliquem diverses experiències de física senzilles, en les quals hem utilitzat materials barats i fàcils de trobar, que en

l'entorn docent faran que el procés d'ensenyament-aprenentatge siga una experiència positiva i enriquidora per als alumnes. Aquests experiments que presentem s'han dissenyat i realitzat al Departament de Física Aplicada de la Universitat d'Alacant.

2. EXPERIÈNCIES DE FÍSICA RECREATIVA

Les experiències de física que presentem es van realitzar amb materials casolans i ens van permetre visualitzar i comprendre alguns fenòmens físics, a més de consolidar importants conceptes de física. Tots els experiments estan presentats seguint el mateix esquema: en primer lloc indiquem els objectius que volem transmetre amb la pràctica d'aquest experiment i les paraules clau, seguidament especifiquem els materials necessaris i una descripció detallada del muntatge experimental amb fotografies, necessàries per a reproduir aquest experiment fàcilment. A continuació detallem el fonament teòric en què es basa aquesta experiència, i per a finalitzar exposem els conceptes que es deuen treballar.

Comencem amb dos experiències en les quals es visualitza el principi de conservació del moment lineal d'una manera molt clara. A continuació presentem algunes experiències de fluids en moviments (aire i aigua) en què es posa de manifest l'efecte Coandă. I per a finalitzar exposem un interessant experiment de física atòmica sobre els espectres d'emissió atòmica en l'espectre visible, que hem anomenat semàfor atòmic, i que estan relacionats amb la quantització dels nivells energètics dels àtoms.

2.1. PRINCIPI DE CONSERVACIÓ DEL MOMENT LINEAL

Objectiu: Visualitzar el principi de conservació del moment lineal.

Paraules clau: Moment lineal; conservació del moment lineal; equació del coet.

Materials: Suport amb peanya, fil, llanda, botella, encenedor, recipient, palletes, punxó, pitxer d'aigua.

Descripció: En un laboratori poden dur-se a terme nombroses experiències que posen de manifest la conservació del moment lineal. En els laboratoris docents de física la més repetida sens dubte és la col·lisió de dos mòbils sobre un carril en què les posicions i velocitats dels objectes són monitoritzades. Un altre experiment famós és el pèndol de Newton. Aquest consisteix en una sèrie de pèndols idèntics (boles) alineats i subjectes per dos fils d'igual longitud que formen el mateix angle (vegeu la figura 2.1). La bola d'un extrem fa moure la bola de l'extrem oposat en col·lidir amb les boles centrals gràcies, precisament, a la conservació del moment lineal.

Figura 2.1. Pèndol de Newton



En aquests sistemes la massa dels mòbils roman constant, de tal forma que el moment transferit produeix una diferència de velocitats dels objectes abans i després de la col·lisió. En aquest treball, en comptes d'utilitzar aquest tipus de sistemes, prepararem dues experiències en les quals la massa del sistema total varia. Inicialment es troben en repòs, però la pèrdua de massa serà la que provoqui un moviment relatiu entre els estats inicial i final.

Per a dur a terme els experiments necessitarem un suport amb peanya, del qual penge un fil on col·loquem una llanda de refresc o una botella de plàstic, depenent del experiment a realitzar. En la superfície cilíndrica de la llanda, practicarem (amb un punxó) tres forats a la mateixa altura guardant la mateixa distància angular entre si, és a dir, 120° . Després doblegarem aquests forats lleugerament de tal forma que la direcció d'eixida no coincidisca amb la direcció normal a la llanda. Finalment, omplirem la llanda amb una mica d'aigua, sense que arribe per damunt dels forats, col·locarem un encenedor per sota d'aquesta i taparem amb cinta adhesiva l'orifici superior de la llanda (per on habitualment es beu). El muntatge experimental es mostra en la figura 2.2. En prendre l'encenedor, l'aigua passarà a vapor, que s'escaparà pels forats realitzats i la llanda començarà a girar al voltant del fil.

En el cas de la botella de plàstic, practicarem els mateixos forats que en la llanda amb un punxó calent, en els col·locarem unes palletes colzades (vegeu la figura 2.3). Després col·locarem un recipient per sota del fil i hi penjarem la botella. Finalment amb el pitxer d'aigua omplirem la botella per sobre dels forats. L'aigua s'escaparà pels forats i la botella començarà a girar com pot veure's en la figura 2.3.

Figura 2.2. Muntatge de la llanda



Figura 2.3 – Muntatge de la botella



Fonament teòric: El moment lineal \vec{p} d'un sistema es defineix com el producte de la seua massa m per la seua velocitat \vec{v} , $\vec{p} = m\vec{v}$. Per al cas de sistemes aïllats, el moment lineal és una magnitud conservada. Això es pot deduir de la segona llei de Newton:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \quad (2.1)$$

Com en un sistema aïllat la força neta és nul·la ($\vec{F} = 0$), es dedueix que $\frac{d\vec{p}}{dt} = 0$ i, per tant, el moment lineal és constant.

En els experiments que hem realitzat considerarem com a sistema la suma del recipient (llanda o botella) i el combustible (vapor d'aigua o aigua). En aquest cas, la massa total del sistema varia de forma contínua, i a partir de l'equació (2.1) es pot obtenir l'anomenada equació del coet [Tipler & Mosca 2011].

En les nostres experiències, la força externa aplicada és nul·la ja que la tensió del fil compensa la força gravitatòria, per això el moment lineal del sistema es constant. Inicialment el sistema està en repòs, i el seu moment lineal es zero, $\vec{p}_{\text{inicial}} = 0$. Quan es calfa la llanda i comença a eixir vapor d'aigua pels forats, com que el moment lineal final també ha de ser zero, hi haurà un moment lineal en sentit oposat, que compense el moment lineal del vapor d'aigua. D'aquesta forma el sistema, que inicialment parteix del repòs, adquireix moviment a mesura que el combustible va esgotant-se. Aquest mateix raonament es pot aplicar al experiment de la botella quan es plena d'aigua que ix per les palletes. La manera en què s'han dissenyat els forats en la llanda o dirigit les palletes en la botella produeix que la

direcció d'ejecció del combustible siga tangencial a l'objecte, i d'aquesta forma la llanda o la botella gira al voltant del fil.

Conceptes que cal reforçar o consolidar: Moment lineal, conservació del moment lineal, equació del coet.

2.2. FLUIDS EN MOVIMENT: EFECTE COANDĂ

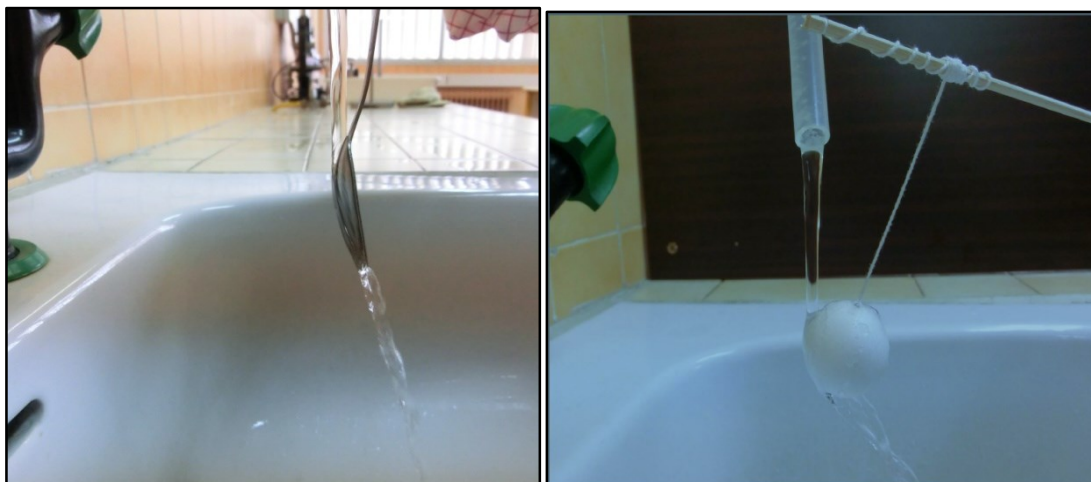
Objectiu: Visualitzar mitjançant una sèrie d'experiments senzills i diferents l'anomenat efecte Coandă: un fenomen físic que té lloc quan un fluid (líquid o gas) en moviment entra en contacte amb una superfície sòlida. Explicarem les diferències fonamentals per a distingir-lo de l'efecte Venturi i donarem exemples d'aplicacions importants de l'efecte Coandă.

Paraules clau: Efecte Coandă; viscositat; mecànica de fluids; fluids en moviment; conservació del moment lineal; tercera llei de Newton; principi de Bernoulli; efecte Venturi; aerodinàmica; aeronàutica.

Materials: Una cullera, una boleta de poliestirè expandit, una corda, una vareta, un eixugador de cabells, dos suports, fil i cinta de paper, objectes amb diferents geometries (recomanable almenys un cilindre i un ortoedre).

Descripció: Detallarem quatre experiments de fluids en moviment (líquid i gas) on es visualitzarà l'efecte Coandă. En primer lloc observarem què succeeix quan un líquid, amb un flux aproximadament constant, entra en contacte amb la superfície d'un material sòlid. Aquestes experiències es realitzaran amb el raig d'aigua d'una aixeta a pressió moderada per a una òptima observació de l'efecte. La primera experiència consisteix a acostar lentament la part convexa d'una cullera al raig d'aigua. Notarem que quan la cullera es troba molt pròxima al líquid apareix una força de succió que provoca l'atracció de la cullera pel corrent d'aigua. Just després, observarem que el corrent d'aigua ha canviat de trajectòria i ara, en lloc de caure verticalment, tendeix a estar pegat a la cullera seguint-ne la curvatura, tal com podem apreciar en la figura 2.4 (a). Si apliquem lleugerament una força per a intentar separar la cullera del raig d'aigua notarem que hi ha una altra força que s'oposa a la nostra i que tendeix a mantenir pegada la cullera al raig d'aigua.

Figura 2.4. Efecte de succió observat en acostar al raig d'aigua (a) la cullera, (b) una boleta lligada amb una corda a una vareta



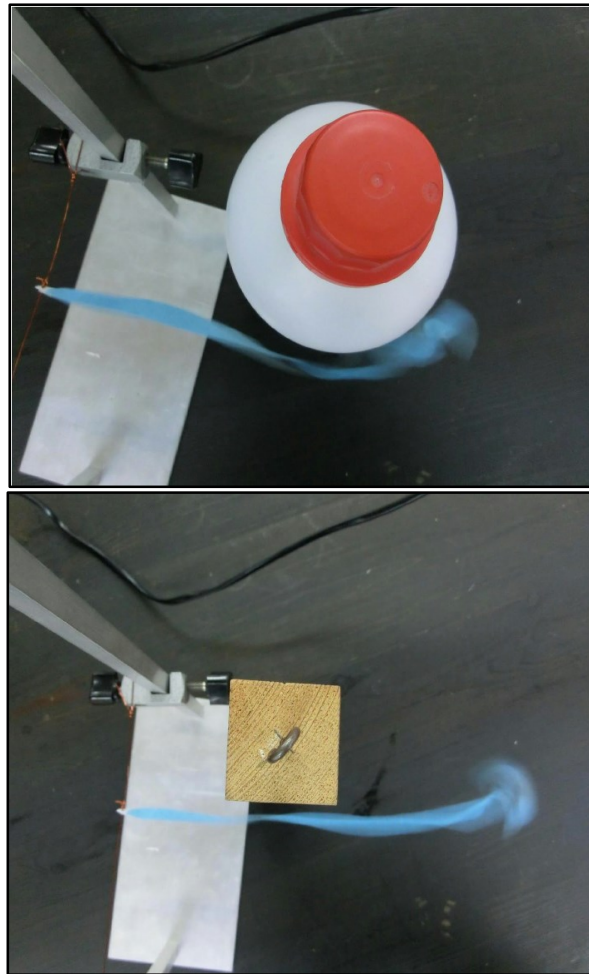
(a)

(b)

La segona experiència és molt semblant a l'anterior, però substituint la cullera per una boleta de poliestirè expandit o una pilota de ping-pong penjant d'una vareta mitjançant una corda (vegeu figura la 2.4 (b)). De nou acostem molt lentament la boleta al raig d'aigua i notarem com reapareix l'efecte de succió i com canvia la trajectòria del corrent d'aigua, que s'adapta a la curvatura de la superfície de la boleta, tal com pot observar-se en la figura 2.4 (b). En aquest cas, el susdit efecte d'atracció el notarem més pronunciat pel simple fet que la boleta té més graus de llibertat per a moure's, ja que no estem exercint una força directament sobre un sòlid rígid com passava amb la cullera, sinó que estem exercint la força sobre la corda que uneix la vareta amb la boleta, de manera que la podem tibar en major o menor mesura. Per açò, veiem que podem jugar variant l'angle de la corda amb què estirem per a separar l'esfera de l'aigua aplicant forces en diferents direccions.

Com el concepte fluid no queda únicament restringit als líquids, sinó que pot ser estès també al cas dels gasos, presentem un altre conjunt de dues experiències en les quals es pot observar l'efecte Coandă quan intervé un corrent d'aire, produït per un eixugador.

Figura 2.5. (a) La cinta de paper es corba seguint la curvatura de la superfície cilíndrica d'una botella. (b) La cinta de paper roman paral·lela al flux d'aire inicial quan acostem un objecte amb una superfície plana



(a) (b)

El primer dispositiu, representat a la figura 2.5 (a), està format per dos suports verticals, col·locats a 25 cm l'ú de l'altre i units per un fil, semblant a una catenària o cable de la línia elèctrica. En el centre del fil enganxarem amb adhesiu una cinta de paper o d'un material lleuger. A continuació, aplicarem un flux d'aire amb l'eixugador a la cinta de paper de manera que aquesta es mantinga en l'aire i alineada amb el raig d'aire, recomanablement paral·lel a la taula, i amb un moviment poc turbulent. Ara, des d'un costat acostarem al corrent d'aire diversos objectes amb diferents tipus de curvatura per a veure com es comporta el fluid quan entra en contacte amb aquestes superfícies. Igual que succeïa amb el cas del líquid, l'aire de l'eixugador “queda enganxat” al sòlid amb el qual interacciona i s'adapta a la curvatura d'aquest. Per açò veurem que la cinta de paper es corba seguint la superfície d'un objecte cilíndric quan aquest s'acosta al corrent d'aire i que no modifica la trajectòria quan aproximem un ortoedre amb una superfície plana paral·lela al flux d'aire (veure la figura 2.5 (b)).

L'últim experiment consisteix a col·locar l'eixugador de manera que l'aire flüisca aproximadament a 60° pel que fa a la vertical. Deixem lentament sobre el

torrent d'aire una boleta lleugera de poliestirè expandit o de ping-pong i observem que, en contra del que podem pensar intuïtivament, la piloteta es manté en l'aire i amb un moviment ascendent i descendent en direcció a l'eixugador (figura 2.6).

Figura 2.6. Força de sustentació fruit de l'efecte Coandă que permet que la boleta es mantinga en l'aire sense caure



Fonament teòric: En 1910 l'enginyer aeronàutic Henri Coandă (1885-1972) va descobrir que el flux d'un fluid (ja siga líquid o gas) tendeix a seguir el contorn de la superfície d'un objecte convex sobre la qual incideix, sempre que la curvatura de la superfície i l'angle d'incidència no siguin massa grans. Aquest efecte és conegut com l'efecte Coandă [Reba 1966].

Tots els fluids en moviment presenten una fricció interna o viscositat quan es desplacen. En fluids com l'aire i l'aigua les forces degudes a la viscositat són xicotetes en comparació amb les forces degudes a la inèrcia i sovint es poden menysprear. Però prop de la superfície d'un sòlid submergit en el flux d'un fluid apareix una capa límit prima on la viscositat té un efecte important. Aquest efecte és degut a les forces intermoleculars entre les molècules del líquid i les del sòlid, així el fluid s'adhereix al sòlid i segueix la curvatura de la seua superfície, tal com indica l'efecte Coandă i hem pogut observar en les experiències exposades anteriorment.

No obstant açò, el procés físic més rellevant que té lloc en les nostres experiències és el de la conservació del moment lineal \vec{p} ($\vec{p} = m\vec{v}$, on m és la massa de l'objecte en moviment i \vec{v} el vector velocitat). Per a qualsevol sistema aïllat, tal com hem demostrat en la secció 2.1, el moment lineal es conserva $\vec{p}_{\text{inicial}} = \vec{p}_{\text{final}}$, així com les seues components en qualsevol direcció. Per aquest mateix motiu, quan en les experiències descrites anteriorment el raig d'aigua s'adhereix a la superfície de la cullera o de la pilota i canvia la trajectòria, podem entendre per què experimentem una força de succió en el sentit contrari al que es desplaça el raig d'aigua.

Inicialment, la cullera o la boleta estan pràcticament en repòs fins que intervé el fluid, per la qual cosa el moment inicial és nul. En aquell moment, l'acció de caure el líquid per la superfície del sòlid i eixir al llarg d'una direcció diferent de la inicial genera una reacció en la resta de l'objecte (cullera o boleta) que està en contacte amb l'aigua, la impulsa en el sentit contrari i l'atrau cap al raig d'aigua. D'aquesta manera, les components dels vectors velocitat s'anul·laran i el moment lineal de l'estat final serà també nul.

En realitat, bàsicament s'està complint la tercera llei de Newton o d'acció i reacció, que estableix que «tot cos A que exerceix una força sobre un cos B experimenta una força d'igual intensitat en la mateixa direcció però en sentit oposat». Per tant, l'efecte Coandă, quan un flux laminar segueix la curvatura d'un objecte convex i canvia la direcció del flux del fluid, segons la tercera llei de Newton provoca l'aparició d'una força de reacció (que hem anomenat força de succió) exercida pel líquid sobre el sòlid (cullera o pilota) [Tipler & Mosca 2011].

En el cas d'un flux d'aire hem pogut comprovar en l'experiment presentat en la figura 2.5 (a) que l'efecte Coandă té lloc només quan interacciona amb un sòlid convex (com una botella), i en aquest cas apareix una força de succió a causa de la tercera llei de Newton que desvia la cinta en direcció a l'objecte. No obstant açò, aquest efecte no té lloc quan l'objecte interposat en el raig d'aire de l'eixugador té parets ortoèdriques, tal com hem trobat en l'experiment de la figura 2.5 (b).

Una aplicació pràctica de l'efecte Coandă la podem trobar en el terreny de l'enginyeria aeronàutica, principalment en el desenvolupament d'aeronaus o sistemes aerodinàmics. L'efecte Coandă és un dels principals mecanismes pels quals un avió aconsegueix mantenir-se en l'aire en ple vol, ja que l'aire que circula adherit a la superfície superior de les ales de l'avió és llançat cap avall, la qual cosa, per la conservació del moment lineal (o tercera llei de Newton), impulsa l'avió cap amunt mitjançant la coneguda força de sustentació [Silva & Soares 2010]. En la nostra experiència amb l'eixugador i la boleta (figura 2.6) ocorre un procés similar. Altres aplicacions de l'efecte Coandă no tan conegudes poden ser l'optimització de peces aerodinàmiques per a automobilisme, de manera que eviten una gran resistència aerodinàmica (com es mostra en l'experiència amb l'eixugador i la cinta de paper), aconseguir separar torrents sanguinis en medicina cardiovascular o, fins i tot, en meteorologia, per a estudiar el flux d'aire en regions muntanyenques [Giles 1977].

Cal esmentar que l'efecte Coandă en ocasions és confós amb l'efecte Venturi, el qual s'explica pel principi de Bernoulli (conservació de l'energia mecànica) i el principi de continuïtat (conservació de la massa), i estableix que un fluid incompressible i ideal (sense fregament) que circula per un conducte tancat, si es troba amb un estrenyiment, augmentarà la seua velocitat de circulació i disminuirà, per tant, la seua pressió. Açò genera que en ocasions es produïska una succió del fluid a altres conductes per l'aparició de pressions menors, mentre que l'efecte Coandă explica el fet que apareguen efectes de succió per la mera conservació del moment lineal, perquè un fluid té la tendència de seguir el contorn de la superfície sobre la qual incideix. Hem de notar que l'explicació que apareix en molts llibres de text sobre la sustentació dels avions basats en la llei de Bernoulli

és incorrecta, ja que hi ha avions que també volen de cap per avall. L'explicació correcta està basada en l'efecte Coandă, que produeix una força de sustentació quan l'aire és obligat a moure's cap avall per a seguir la curvatura de la capa límit que es forma al voltant de l'ala de l'avió a causa de la viscositat de l'aire.

Conceptes que cal reforçar: Concepte de fluid englobant líquids i gasos, conservació del moment lineal i aparició de forces d'acció i reacció, diferència entre l'efecte Coandă i l'efecte Venturi.

2.3. SEMÀFOR ATÒMIC

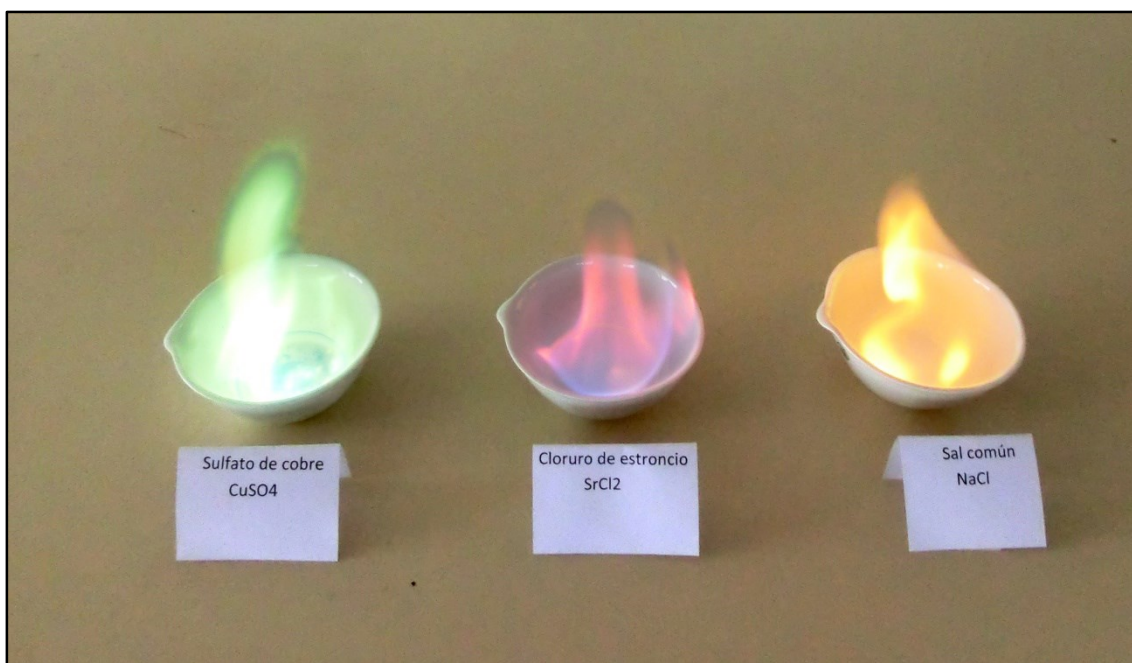
Objectius: Introduir els conceptes d'espectre visible d'emissió atòmica, transicions electròniques entre nivells discrets (quàntics) d'àtoms en estat excitat i estat fonamental.

Concretament, familiaritzar els alumnes amb la relació entre els nivells discrets (quantitzats) d'energia dels àtoms i la longitud d'ona de la llum que emeten quan passen d'un estat excitat al seu estat d'energia més baix (que és el seu estat fonamental).

Paraules Clau: Emissió atòmica; nivells atòmics; longitud d'ona; espectre d'emissió atòmica.

Materials: 20 ml de metanol, 100 mg de les següents sals inorgàniques: clorur d'estranci (SrCl_2), clorur de sodi (NaCl , sal de taula) i sulfat de coure (CuSO_4). 3 bols de ceràmica de 5 cm de diàmetre aproximadament, i mistos. Adhesius per a etiquetar les sals.

Figura 2.7. D'esquerra a dreta: Els colors produïts per l'emissió atòmica espontània d'àtoms excitats de coure (verd), estranci (roig) i sodi (groc) en una flama de metanol

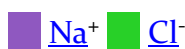
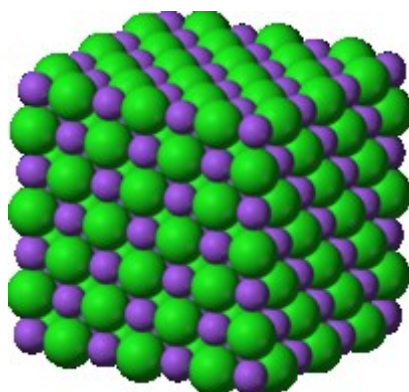


Descripció experimental: Transfereix una petita quantitat (100 mg) de cada sal inorgànica: SrCl_2 , NaCl i CuSO_4 a un bol de ceràmica de 5 cm de diàmetre, per separat. Identifica amb l'adhesiu la sal que es troba en cada bol. Ara afegeix una petita quantitat (2 ml) de metanol a cada bol (amb cura perquè el metanol és tòxic).

Una vegada acabat aquest pas, utilitza un encenedor de cuina per a encendre amb cura el metanol en cada bol. Passat un minut o dos, les flames començaran a canviar de color. El clorur d'estranci presentarà una flama roja intensa, el clorur de sodi, una flama groga molt intensa, i el sulfat de coure una flama verda intensa (vegeu la figura 2.7).

Fonament teòric: Les sals inorgàniques són compostos iònics formats normalment per dos elements [Tipler & Mosca 2011]. Per exemple, en el NaCl tenim un metall, el sodi, i un aïllant, el clor (vegeu la figura 2.8). Es denomina *iònic* perquè durant el procés de formar el compost, el metall «dóna» els seus electrons de valència, els electrons «actius» d'un àtom (de més alta energia), que es converteix en un *catió*, al compost aïllant, que es converteix en un *anió*. D'aquesta manera es considera que en el compost dels dos elements, el metall porta una càrrega positiva, i l'aïllant una càrrega negativa, una situació que resulta ser de més estabilitat energètica per als dos elements.

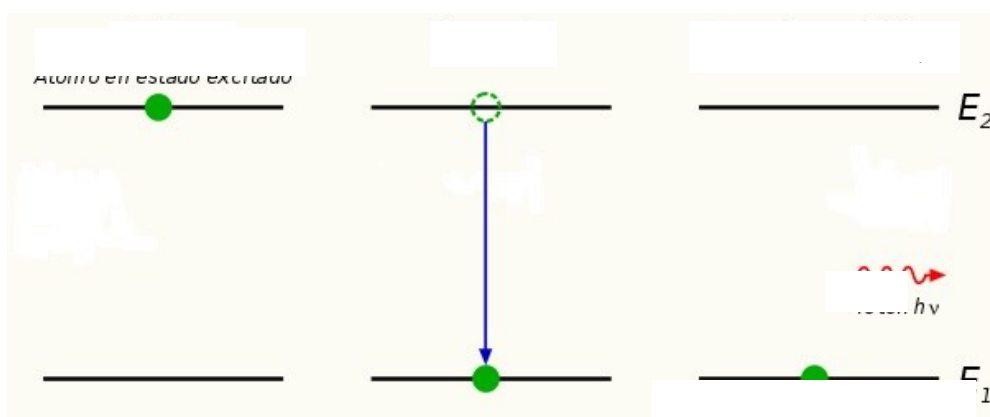
Figura 2.8. Estructura d'un cristall de clorur de sodi, exemple d'un compost iònic. Les esferes porpres són cations de sodi, i les esferes verdes són anions de clor.¹



No obstant això, quan una petita quantitat d'aquests compostos està dissolta en metanol, un alcohol volàtil i inflamable, i a la mescla se li cala foc, la sal es volatilitza juntament amb el metanol, i l'energia que la calor de la flama dóna a la sal permet que es forme en la flama un gas d'àtoms neutres del metall i de l'aïllant. La calor, a més, excita un o més dels electrons de valència del metall des del seu estat d'energia més baixa, l'estat denominat *fonamental*, a un estat d'energia més alt, o un estat denominat *excitat* (vegeu figura 2.9).

¹ Font d'imatge i descripció:
http://es.wikipedia.org/wiki/compuesto_i%C3%B3nico#/mitjana/File:Sodium-chloride-3D-ionic.png

Figura 2.9. Emissió atòmica espontània.²



Una manera típica per a un gas d'àtoms excitats de perdre energia és per mitjà de l'emissió espontània de llum, tal com es mostra en la figura 2.9 [Tipler & Mosca 2011]. Els àtoms aïllats són sistemes molt especials, denominats *sistemes quàntics*. Se'n diuen així perquè les energies dels electrons en els àtoms no poden tenir qualsevol valor. Els electrons que orbiten el nucli d'un àtom es comporten com a ones, típic dels sistemes quàntics. I el fenomen de la interferència que afecta les ones també es produeix a zones al voltant del nucli de l'àtom on hi ha interferència destructiva, on no poden haver electrons, i altres zones d'interferència constructiva, on els electrons passen la major part del temps al voltant del nucli de l'àtom. Aquest fenomen, combinat amb el principi d'exclusió de Pauli, que estableix que dos electrons no poden compartir el mateix estat quàntic en la mateixa regió de l'espai, fa que els electrons no poden posseir qualsevol valor d'energia en les seues òrbites al voltant del nucli de l'àtom, sinó solament algunes energies específiques [Tipler & Mosca 2011].

D'aquesta manera es pot explicar el color de la llum que generen les sals inorgàniques quan es cremen en el metanol. Si tornem a fixar-nos en la figura 2.9, l'electró de l'estat excitat E_2 d'un àtom en el gas d'estronci, sodi o coure dins de la flama perd la seua energia espontàniament i cau a l'estat fonamental d'energia E_1 d'un àtom neutre d'estronci, sodi o coure. Però, com que l'energia ni es crea i ni es destrueix, l'energia perduda per l'electró quan cau d'un nivell més alt d'energia a un nivell més baix es converteix en un fotó d'energia $h\nu$:

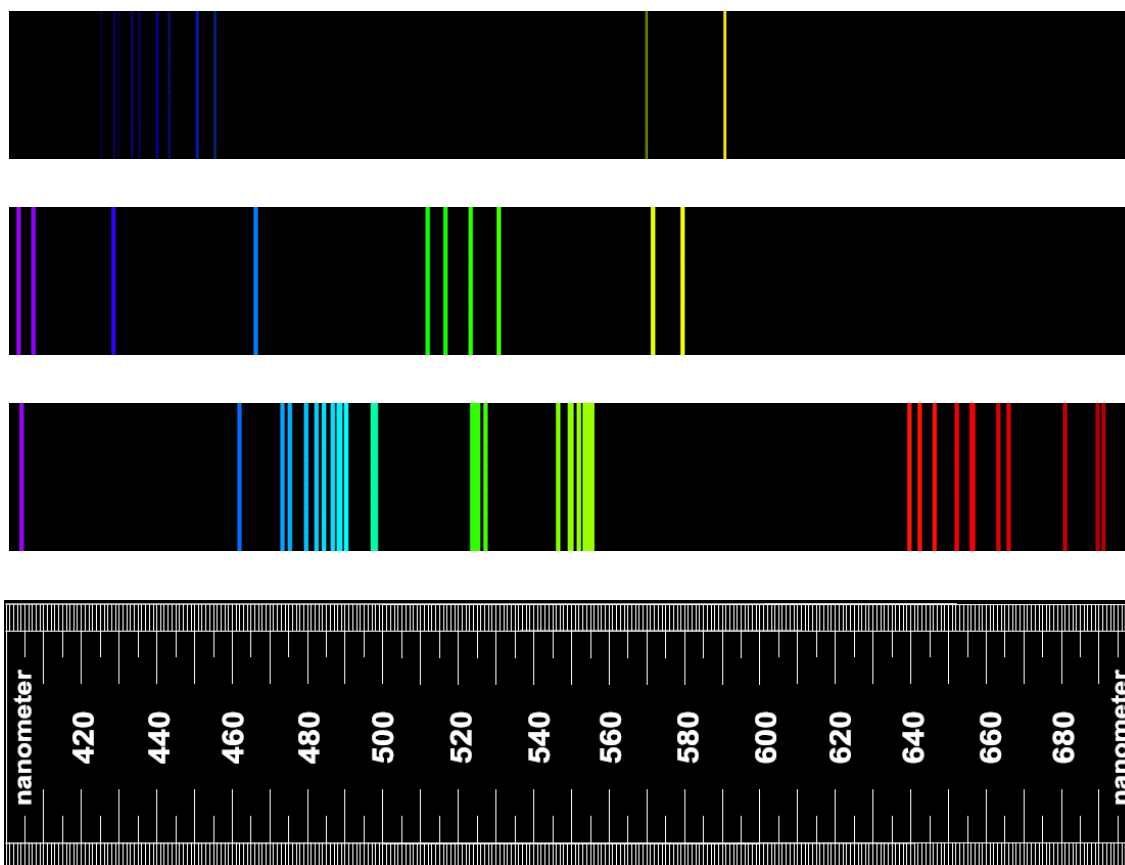
$$E_2 - E_1 = h\nu = hc / \lambda \quad (2.3)$$

en què h és la constant de Planck, ν és la freqüència del fotó, c és la velocitat de la llum en el buit i λ és la longitud d'ona del fotó. És comú representar la longitud d'ona dels fotons que són emesos per àtoms dins d'una flama en forma d'un espectre de línies d'emissió de llum visible [Tipler & Mosca 2011], amb uns

² Font d'imatge: http://commons.wikimedia.org/wiki/file:Emisi%C3%B3n_espont%C3%A1nea.jpg

valor de longitud d'ona que estan entre 390 i 700 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) (vegeu la figura 2.10).

Figura 2.10. Línies espectrals d'emissió atòmica, de dalt a baix: sodi, coure i estronci.³



En el cas de l'experiment dut a terme per a aquest treball, les longituds d'ona corresponen aproximadament (vegeu la figura 2.10) a 590 nm per al sodi, 510-530 nm per al coure i 640-690 nm per a l'estranci, els quals corresponen als colors groc, verd i roig, respectivament. En aquest procés també intervé l'emissió atòmica dels anions, però la seua intensitat d'emissió és bastant menor que la dels metalls per als casos analitzats en aquest treball [NIST 2015].

Conceptes a reforçar: Estats excitats i fonamentals d'àtoms aïllats; quantització de l'energia en els àtoms aïllats; relació entre energia, freqüència i longitud d'ona de la llum emesa d'un àtom excitat; concepte de la conservació d'energia: energia de desexcitació convertida en emissió de llum.

3. CONCLUSIONS

Els experiments de física recreativa són una eina docent molt interessant ja que capten l'atenció dels estudiants i estimulen el seu interès per la ciència. La

³ Font d'imatges: <http://chemistry.bd.psu.edu/jircitano/periodic4.html>; <http://concave.stc.arizona.edu/thepoint/interactive/spectraline.html>

utilització de materials barats i casolans que permeten reproduir les experiències d'una manera senzilla és molt important ja que això fa possible dur a terme els experiments en entorns molt variats. S'ha comprovat que aquest tipus de recurs didàctic fa que el procés d'aprenentatge siga més significatiu i per tant perdure en el temps [Oliva 2008]. També és possible dissenyar experiències per a fonamentar un determinat concepte físic difícil d'explicar teòricament, però que amb un simple experiment queda clarament comprès per l'alumnat.

Hem presentat experiments que demostren el principi de conservació del moment lineal, experiments de fluids en moviment (aigua i aire) en què s'evidencia l'efecte Coandă, i un experiment de física atòmica que posa en evidència d'una manera molt senzilla la quantització dels nivells d'energia dels àtoms i la relació entre les transicions electròniques dels àtoms i la longitud d'ona de la llum emesa.

4. DIFICULTATS TROBADES, PROPOSTES DE MILLORA I PREVISIÓ DE CONTINUÏTAT

Volem continuar amb el disseny i l'elaboració de diferents experiències de física corresponents a diverses àrees d'aquesta matèria. Partirem dels errors conceptuals que trobem en els nostres alumnes quan arriben a la universitat, i intentarem dur a terme experiments que permeten aclarir aquests errors. La utilització de materials barats i assequibles serà fonamental per a la realització d'aquest projecte d'innovació pedagògica.

5. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Caamaño A. (1992) Los trabajos prácticos en ciencias experimentales. Una reflexión sobre sus objetivos y una propuesta para su diversificación. *Aula de Innovación Educativa* 9, 61-68 Barcelona.
- Chalmers A. F. (1988) ¿Qué es esa cosa llamada ciencia?, Siglo XXI Editores, Argentina.
- García Molina R. (coord.) (2011) Monográfico sobre ciencia recreativa. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 8 (número extraordinari).
- Giles B. D. (1977) Fluidics, the Coandă effect, and some orographic winds. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A* 25, 273-279.
- Hoffmann R. & McGuire S. Y. (2009) Teaching and learning strategies that work. *Science* 325, 1203-1204.
- NIST (2015) National Institute of Standards and Technology: Physical Measurement Laboratory. Basic Atomic Spectroscopic Data - Periodic Table. Trobat el 29-04-2015 en <http://physics.nist.gov/physrefdata/handbook/periodictable.htm>
- Oliva J. M. (2008) Ciencia recreativa, educación científica en contextos y mediante recursos no formales, e investigación en didáctica de las ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 5, 1. http://www.apac-eureka.org/revista/Volumen5/Numero_5_1/Vol_5_Num_1.htm
- Reba I. (1966) Applications of the Coanda effect. *Scientific American* Juny, 84.
- Silva J. & Soares A. A. (2010), Understanding wing lift, *Physics Education* 45, 249-252.

Solbes J., Lozano O. & Garcia Molina R. (2009) Análisis del uso de la ciencia recreativa en la enseñanza de materias científicas y técnicas en educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias* Número Extra VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, 1741-1745.
http://ice.uab.cat/congresos2009/eprints/cd_congres/propostes_html/propostes/art-1754-1758.html

Tipler P. A. & Mosca G. (2011) *Física per a la ciència i la tecnologia*, Reverté, Barcelona.